

На правах рукописи



Горбенко Анна Андреевна

**МЕТОДЫ
КОМБИНАТОРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург - 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина” на кафедре алгебры и дискретной математики Института математики и компьютерных наук.

Научный руководитель: Попов Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Корольков Юрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО “Иркутский государственный университет”, заведующий кафедрой прикладной алгебры и защиты информации Института математики, экономики и информатики;

Плющенко Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, ЗАО “Восточный ветер - Eastwind”, разработчик группы роуминга отдела биллинга.

Ведущая организация: ФГБУН “Институт математики и механики им. Н.Н.Красовского УрО РАН”.

Защита состоится «20» июня 2014 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.25 на базе ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина” по адресу: 620000, г.Екатеринбург, пр. Ленина 51, зал заседаний диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина”, <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Пименов В.Г.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование математических моделей, вычислительных методов и алгоритмов для робототехнических систем относится к одному из наиболее актуальных направлений современной математики^{[1],[2]}. Особенно интенсивно в последние годы развивается проблематика, связанная с мобильными роботами.

Виртуализация — это общий подход, заключающийся в использовании некоторых методов абстрактного рассмотрения ресурсов. Наиболее интенсивно различные методы виртуализации применяются в программировании. Использование виртуализации делает программно-аппаратный комплекс существенно более универсальным. Методы виртуализации для роботов на сегодняшний день находятся на существенно более ранней стадии, чем для компьютерных систем. Однако в робототехнике уже давно считается общепринятой необходимостью использования абстрактных понятий и применения некоторых методов виртуализации при разработке комплексного программного обеспечения^[3].

Степень разработанности темы. В последние годы при построении различных математических моделей для робототехнических систем появился интерес к использованию закономерностей из области комбинаторики слов^{[4],[5],[6]}. Хотя такой подход для робототехники является сравнительно новым, уже сейчас можно сказать, что его применение позволяет получать весьма точные и эффективные модели для различных конкретных задач. Важнейшим преимуществом использования закономерностей из области комбинаторики слов яв-

¹Kelly A. Mobile robotics: mathematics, models, and methods / A. Kelly. — Cambridge: Cambridge University Press, 2013. —808 p.

²Kober J. Learning motor skills: from algorithms to robot experiments / J. Kober, J. Peters. —Cham: Springer, 2014. —201p.

³Hsieh M. Adaptive teams of autonomous aerial and ground robots for situational awareness: field reports / M. Hsieh, C. Cowley, J. Keller, L. Chaimowicz, B. Grocholsky, V. Kumar, C. Taylor, Y. Endo, R. Arkin, B. Jung, D. Wolf, G. Sukhatme, D. MacKenzie // Journal of field robotics. —2007. —V.24, N.11-12. —P.991–1014.

⁴Argyros A. Robot homing by exploiting panoramic vision / A. Argyros, K. Bekris, S. Orphanoudakis, L. Kavraki // Autonomous robots. —2005. —V.19, N.1. —P.7–25.

⁵Lamon P. Deriving and matching image fingerprint sequences for mobile robot localization / P. Lamon, I. Nourbakhsh, B. Jensen, R. Siegwart // Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. —Piscataway: IEEE Press, 2001. —P.1609–1614.

⁶Pradel G. Symbolic trajectory description in mobile robotics / G. Pradel, C. Căleanu // Mobile robots: perception & navigation. —Rijeka: InTech, 2007. —P.543–570.

ляется виртуализация в соответствующих математических моделях. Такой способ виртуализации мы в дальнейшем будем называть комбинаторной виртуализацией.

Несмотря на очевидные преимущества, которые может дать комбинаторная виртуализация в робототехнике, на сегодняшний день существенным препятствием для активного использования этого метода в робототехнике является то, что большинство задач поиска комбинаторных закономерностей относится к классу вычислительно трудных проблем. Наличие вычислительно эффективных алгоритмов для решения трудных проблем комбинаторики слов позволило бы существенно повысить качество многих математических моделей комбинаторной виртуализации для роботов. Задача 3-выполнимости (3SAT) является одной из наиболее известных и хорошо изученных **NP**-полных проблем^[7]. Для проблемы 3SAT разработано большое количество эффективных алгоритмов^[7], обычно называемых SAT-решателями. Нахождение сведения к 3SAT широко применяется для решения различных вычислительно трудных проблем. Естественно использовать такой подход и в робототехнике. Математически строгая формализация этого подхода может быть дана с использованием конструктивного полиномиального сведения α_c в рамках вычислительной логики предикатов *CPL* (computational predicate logic), удовлетворяющей системе аксиом Гейтинга^[8]. Конструктивное полиномиальное сведение проблемы *A* к проблеме *B* мы в дальнейшем будем обозначать $CPL \vdash A \alpha_c B$.

Для практического использования некоторой комбинаторной проблемы *A* в робототехнике получения $CPL \vdash A \alpha_c 3SAT$ недостаточно. Необходимо для данного сведения $CPL \vdash A \alpha_c 3SAT$ найти SAT-решатель, который будет демонстрировать высокую эффективность на робототехнических данных с использованием вычислительных возможностей, которые доступны робототехническому комплексу. Более того, робототехническим комплексам, кроме решения той или иной комбинаторной проблемы, одновременно необходимо решать и ряд других задач. Поэтому решатель должен быть тем или иным образом интегрирован в общую вычислительную систему робота. Естественно возникает вопрос о разработке некоторого обще-

⁷Kilani Y. A survey of the satisfiability-problems solving algorithms / Y. Kilani, M. Bsoul, A. Alsarhan, A. Al-Khasawneh // International journal of advanced intelligence paradigms. –2013. –V.5, N.3. –P.233 –256.

⁸Constable R. Formalizing decidability theorems about automata / R. Constable // Computational logic. NATO ASI Series. Series F: computer and systems sciences. – 1999. –V.165. –P.179 –213.

го метода комбинаторной виртуализации для современных роботов, который включал бы в себя математические модели, вычислительные методы и общие подходы к созданию программного обеспечения, позволяющие эффективно решать вычислительно трудные комбинаторные проблемы.

В последние годы на первый план в развитии мировой робототехники выдвигаются мобильные сервисные роботы. Большинство сервисных роботов — это устройства, рассчитанные на массовое внедрение. Они должны быть сравнительно простыми и дешевыми, обладать минимальным набором сенсоров и сравнительно скромными вычислительными ресурсами. Однако в большинстве случаев сервисный робот имеет возможность подключения к внешним вычислительным ресурсам. При этом часто внешние вычислительные ресурсы могут быть весьма значительными (кластеры, суперкомпьютеры, сети суперкомпьютеров). Отметим, что рассмотрение мобильного робота с одним визуальным сенсором является типичным для робототехнических исследований. Более того, разработка математической модели для системы управления мобильного робота с одним визуальным сенсором позволяет обеспечить базовую математическую модель для целого ряда классов сервисных роботов. Таким образом, хотя рассмотрение простейших мобильных роботов и оставляет за рамками такие классы, как шагающие и манипуляторные роботы, класс простейших мобильных роботов является достаточно общим и содержательным. Поэтому является весьма актуальной задача разработки комплекса математических моделей комбинаторной виртуализации и соответствующего алгоритмического обеспечения, которые могли бы послужить принципиальной основой для обеспечения функционирования мобильного робота с одним визуальным сенсором.

В зависимости от типа робота, его сенсоров, решаемых задач, условий функционирования, а также ряда других факторов в архитектуре робота могут быть выделены различные системы. Часть систем может быть отнесена к специфике задач, решаемых роботами. Однако присутствие некоторых систем очевидным образом определяется архитектурой рассматриваемого класса роботов. Для мобильного робота с одним визуальным сенсором к таким системам относятся: система обработки моторных примитивов; визуальная система навигации; система распознавания изображений. Исследование метода комбинаторной виртуализации для мобильного робота с одним визуальным сенсором естественным образом разбивается на разра-

ботку соответствующих методов для трех его основных систем.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является разработка метода комбинаторной виртуализации для мобильного робота с одним визуальным сенсором, который включал бы в себя математические модели, вычислительные методы и общие подходы к созданию программного обеспечения, позволяющие эффективно решать вычислительно трудные проблемы комбинаторики слов при помощи подключения к внешним вычислительным ресурсам. В рамках диссертационного исследования необходимо рассмотреть три основные системы робота: система обработки моторных примитивов; визуальная система навигации; система распознавания изображений. Для каждой из этих систем определить подходящий уровень виртуализации, подобрать необходимые комбинаторные закономерности и разработать соответствующие методы.

Научная новизна. Все результаты работы являются новыми. Представленный в диссертации общий метод комбинаторной виртуализации впервые применен для комплексного моделирования функционирования робота.

Теоретическая и практическая значимость работы. Работа носит теоретический характер. Ее результаты могут быть использованы для дальнейших исследований в области математического моделирования для интеллектуальных мобильных роботов. Кроме того, результаты работы обеспечивают теоретический фундамент для создания эффективных систем управления мобильных сервисных роботов, что делает естественным их применение в робототехнике.

Основные методы исследований. Основными методами исследований являются методы математического моделирования; математической логики и теории алгоритмов; интеллектуальных систем; численных методов; вычислительного эксперимента; автоматического программирования. В частности, в диссертации используются методы как классической логики, так и вычислительной логики предикатов. Активно применяются различные типы нейронных сетей. Среди нейросетевых методов одним из основных является вычислительный метод, основанный на нейронных сетях Рунге — Кутты. Мы рассматриваем персептронные и рекуррентные нейронные сети Рунге — Кутты 4 порядка. Их обучение основано на градиентных и нелинейных рекурсивных алгоритмах. Используются как классические, так и коэволюционные генетические алгоритмы. Применяются различные варианты фильтра Калмана.

Положения, выносимые на защиту. Метод комбинаторной виртуализации для мобильного робота с одним визуальным сенсором, включающий в себя:

- метод комбинаторной виртуализации системы обработки примитивов двигателя на основе проблемы поиска приближенного периода;
- метод комбинаторной виртуализации для визуальной системы навигации на основе проблем поиска кратчайшей общей упорядоченной надпоследовательности, циклического центра, наибольшей общей подпоследовательности с ограничениями;
- метод комбинаторной виртуализации для оптимизации множества алгоритмов распознавания системы распознавания изображений на основе проблемы покрытия стеков.

Степень достоверности и апробация результатов. Все математические утверждения, полученные в рамках диссертационного исследования, приведены с полными доказательствами. Проведен сопоставительный анализ существующих и разработанных подходов. Кроме того, достоверность и обоснованность полученных в диссертационном исследовании результатов подтверждена вычислительными и робототехническими экспериментами.

Результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: 9-я Международная конференция “Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах” (Владимир, 2009г.); Межвузовская научная конференция по проблемам информатики “СПИСОК – 2009” (Екатеринбург, 2009г.); Итоговая конференция XIV областного конкурса научно-исследовательских работ студентов учреждений высшего и среднего профессионального образования Свердловской области (НИРС) “Научный Олимп” (Екатеринбург, 2011г.); 42-ая Всероссийская молодежная конференция “Современные проблемы математики” (Екатеринбург, 2011г.); The 4th international conference on advanced computer control (Shanghai, China, 2012); Научно-технический семинар “Робототехника и безлюдные технологии. Перспективы развития и возможности УрФУ” (Екатеринбург, 2013г.); The 2nd international conference on machine design and manufacturing engineering (Jeju Island, South Korea, 2013); The 3rd international conference on computer-aided design, manufacturing, modeling and simulation (Chongqing, China, 2013); The 11th international conference of numerical analysis and

applied mathematics (Rhodes, Greece, 2013); The 3rd international conference on advanced materials and engineering materials (Singapore, 2013). Также результаты диссертации регулярно докладывались на научном семинаре отдела интеллектуальных систем и робототехники РУНЦ “Интеллектуальные системы и информационная безопасность” Института математики и компьютерных наук УрФУ. Результаты также были представлены на Уральской международной выставке и форуме промышленности и инноваций ИННОПРОМ-2010 и третьей международной выставке и форуме промышленности и инноваций ИННОПРОМ-2012 (Екатеринбург, 2010г. и 2012г.).

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 9 в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus; получены свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и патент на полезную модель.

Личный вклад. Все результаты диссертационной работы получены автором лично.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и патент на полезную модель получены в соавторстве. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ получено для управляющей программы гусеничного робота Kuzma-II, состоящей из двух частей: низкоуровневой и высокоуровневой. Низкоуровневая часть была разработана и реализована А.С. Шекой. Эта часть отвечает за непосредственный доступ к сенсорам и двигателям робота. Высокоуровневая часть была разработана и реализована автором. Эта часть отвечает за системы навигации и распознавания. Патент на полезную модель включает большое количество различных подсистем, из которых автору принадлежит серверная система распознавания. Из результатов, отраженных в свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ и патенте на полезную модель, в диссертацию включены только принадлежащие лично автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 192 наименования, и списка иллюстративного материала. Общий объем диссертации составляет 143 страницы. Она содержит 31 рисунок и 25 таблиц.

Основное содержание работы

В первой главе рассмотрен метод комбинаторной виртуализации для системы обработки моторных примитивов. Метод основан на хорошо известном подходе к классификации моторных примитивов, созданию их систем и использованию при обучении, предполагающем выделение однократных и ритмических демонстраций^[9], а также на символьном подходе к описанию траекторий^[6] при помощи вычисления алфавитно-взвешенного редакционного расстояния^[10], которое обычно называют расстоянием Левенштейна, и применения закономерностей комбинаторики слов. Предложенный в диссертации метод использует систему подтверждения выполнения команд роботом на основе конструктивной логики^{[8],[11]}; автоматическое порождение роботом алфавитов примитивов двигателя и расстояния Левенштейна; модель сравнения последовательностей примитивов при помощи поиска приближенного периода^[12].

Для комбинаторной виртуализации системы обработки моторных примитивов диссертантом предложены вычислительный метод, связанный с решением проблемы существования приближенного периода (AP) и базирующийся на следующем утверждении.

Теорема 1. $CPL \vdash AP \propto_c 3SAT$.

При наличии доступа к внешним вычислительным ресурсам робот обращается к ним для нахождения решения проблемы AP при помощи SAT-решателей, что обеспечивает ему оптимальное решение модели сравнения последовательностей примитивов. Результаты экспериментального исследования продемонстрировали наличие эффективных SAT-решателей для AP.

В режиме реального времени применяется стандартный подход, основанный на получении приближенных решений модели сравнения последовательностей при помощи рекуррентной нейронной сети, обучаемой при помощи генетического алгоритма. Для повышения эффективности нейросетевого метода рассматривается вариант обу-

⁹Kober J. Learning motor primitives for robotics / J. Kober, J. Peters // Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. – Piscataway: IEEE Press, 2009. –P.2112 –2118.

¹⁰Гасфилд Д. Строки, деревья и последовательности в алгоритмах / Д. Гасфилд. –СПб.: Невский Диалект, 2003. –654 с.

¹¹O'Connor R. Classical mathematics for a constructive world / R. O'Connor // Mathematical structures in computer science. –2011. –V.21. –P.861 –882.

¹²Sim J. Approximate periods of strings / J. Sim, C. Iliopoulos, K. Park, W. Smyth // Theoretical computer science. –2001. –V.262, N.1-2. –P.557 –568.

чающего генетического алгоритма, использующего для вычисления функции приспособленности ранее полученные при помощи SAT-решателей решения проблемы AP. Это позволяет существенно повысить качество решения.

Вторая глава посвящена вопросам комбинаторной виртуализации визуальных систем навигации. В рамках наиболее распространенных взглядов на построение визуальных систем навигации для современных автономных сервисных роботов наибольший интерес представляет топологическая навигация^{[4],[5],[6],[13]}. При этом с точки зрения комбинаторной виртуализации можно выделить следующие три проблемы: построение панорамного изображения; выбор конкретного множества дорожных знаков; совмещение дорожных знаков на различных изображениях^{[4],[5],[14],[15]}.

Для построения панорамного изображения рассматривался ряд подходов, основанных на использовании закономерностей комбинаторики слов: кратчайшей общей надстроки, кратчайшей общей надпоследовательности и кратчайшей общей упорядоченной надпоследовательности (SCOS)^[16]. Вычислительные эксперименты показали, что количество правильно построенных панорам, полученных при помощи решения проблемы SCOS, превосходит аналогичный результат для других моделей в 2 — 4 раза и для различных роботов составляет от 78 % до 97 % от общего количества панорам^[16]. Поэтому для комбинаторной виртуализации построения панорамного изображения в диссертации рассмотрена проблема SCOS.

Диссертантом доказано, что проблема SCOS является **NP**-полной. Для нахождения эффективного вычислительного метода комбинаторной виртуализации проблемы построения панорамного изображения доказано следующее утверждение.

Теорема 2. $CPL \vdash SCOS \propto_c 3SAT$.

При наличии доступа к внешним вычислительным ресурсам робот обращается к ним для нахождения решения проблемы SCOS при

¹³Goedeme T. Robust vision-only mobile robot navigation with topological maps / T. Goedeme, L. Van Gool // Motion planning. –Rijeka: InTech, 2008. –Chapter 4. –P.63 –88.

¹⁴Brown M. Automatic panoramic image stitching using invariant features / M. Brown, D. Lowe // International journal of computer vision. –2007. –V.74, N.1. –P.59 –73.

¹⁵Michel D. Horizon matching for localizing unordered panoramic images / D. Michel, A. Argyros, M. Lourakis // Computer vision and image understanding. –2010. –V.114, N.2. –P.274 –285.

¹⁶Popov V. Building the panoramic image for mobile robot localization / V. Popov, A. Gorbenko // Applied mechanics and materials. –2013. –V.365-366. –P.967 –970.

помощи SAT-решателей, что обеспечивает ему оптимальное решение модели построения панорамного изображения. Результаты экспериментального исследования продемонстрировали наличие эффективных SAT-решателей для SCOS.

В режиме реального времени применяется подход, основанный на получении приближенных решений модели построения панорамного изображения при помощи коэволюционного генетического алгоритма. Для повышения эффективности коэволюционного метода рассматривается его вариант, использующий для вычисления функции приспособленности ранее полученные при помощи SAT-решателей решения проблемы SCOS. Это позволяет существенно повысить качество решения.

Следует отметить, что в робототехнике для моделирования конкретных множеств дорожных знаков широко используются циклические строки^{[4],[5]}. Эффективность этой модели считается общепризнанной. Поэтому для комбинаторной виртуализации выбора конкретного множества дорожных знаков естественно использовать некоторый метод сравнения циклических строк. Для выбора конкретного множества дорожных знаков было предложено использование проблем существования циклического центра (CCS) и циклического центра с фиксированными буквами (CCSFL)^[17]. Результаты экспериментального сравнительного исследования продемонстрировали высокую эффективность применения CCS и CCSFL^[17]. В частности, результаты экспериментального исследования показали, что хотя использование CCSFL в общем случае обеспечивает более высокую точность навигации, чем CCS, на практически значимых для современных роботов дистанциях CCSFL и CCS отличаются лишь незначительно^[17]. В частности, на дистанции 10 метров отклонение от цели для CCS больше отклонения от цели для CCSFL всего на 2 сантиметра^[17]. Поэтому использования только CCS для выбора конкретного множества дорожных знаков на сегодняшний день вполне достаточно. А рассмотрение CCSFL представляет интерес преимущественно в перспективе дальнейшего развития робототехники.

Заметим, что **NP**-полнота проблемы CCS является несложным следствием **NP**-полноты проблемы существования центра^[18]. Поэто-

¹⁷Popov V. The problem of selection of fingerprints for topological localization / V. Popov // Applied mechanics and materials. –2013. –V.365-366. –P.946 –949.

¹⁸Frances M. On covering problems of codes / M. Frances, A. Litman // Theory of computing systems. –1997. –V.30, N.2. –P.113 –119.

му представляет интерес следующее утверждение.

Теорема 3. $CPL \vdash CCS \propto_c 3SAT$.

Во второй главе представлен вычислительный метод для комбинаторной виртуализации выбора конкретного множества дорожных знаков, основанной на применении CCS. При наличии доступа к внешним вычислительным ресурсам робот обращается к ним для нахождения решения проблемы CCS при помощи SAT-решателей. Результаты экспериментального исследования продемонстрировали наличие эффективных SAT-решателей для CCS. В режиме реального времени возможно получение приближенных решений CCS при помощи генетических алгоритмов. Для повышения эффективности такого подхода используется вычисление функции приспособленности на основе ранее полученных SAT-решателями решений проблемы CCS. Это позволяет существенно повысить качество решений генетических алгоритмов.

Подход к совмещению дорожных знаков, основанный на использовании поиска наибольшей общей подпоследовательности, хорошо известен^[4]. В диссертации для комбинаторной виртуализации совмещения дорожных знаков применяется обобщение этой комбинаторной проблемы — проблема существования наибольшей общей подпоследовательности с ограничениями (C-LCS)^[19]. Поскольку проблема C-LCS является NP-полной^[19], представляет интерес следующее утверждение.

Теорема 4. $CPL \vdash C-LCS \propto_c 3SAT$.

Во второй главе применение метода комбинаторной виртуализации для совмещения дорожных знаков рассмотрено на примере задачи наблюдения за пассажирскими потоками. Вычислительные эксперименты показали, что нахождение оптимальных решений для C-LCS возможно при помощи бортовых SAT-решателей в режиме реального времени. Отметим, что основное преимущество C-LCS по сравнению с поиском наибольшей общей подпоследовательности заключается в том, что наиболее важные дорожные знаки могут быть включены в ограничения. В этом случае ключевые идентификаторы сцены не будут потеряны при нахождении подпоследовательности.

В отличие от распознавания образов, представляющего собой строгую математическую теорию, распознавание изображений относится преимущественно к области применения эвристических

¹⁹Gotthilf Z. Constrained LCS: hardness and approximation / Z. Gotthilf, D. Hermelin, M. Lewenstein // Lecture notes in computer science. –2008. –V.5029. – P.255 –262.

методов^[20]. Специфика автономных сервисных роботов, связанная с необходимостью адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования, делает естественным использование автоматического порождения модулей распознавания изображений.

Следует отметить, что хотя первые работы по автоматическому порождению модулей распознавания изображений появились еще в 80-е годы XX века, многие ключевые вопросы в этой области до сих пор остаются без ответа^[21]. Важнейшим препятствием на пути распространения использования известных на сегодняшний день методов автоматического порождения модулей распознавания является наличие тесной связи между вычислительной сложностью того или иного детерминированного метода и его выразительными возможностями^[21]. Исходя из этого, для современного робота вопрос автоматического порождения модулей распознавания естественно рассматривать только в контексте порождения интеллектуальных анализаторов. Использование большого количества анализаторов существенно понижает производительность системы распознавания. Поэтому необходим механизм, который определял бы количество и порядок использования анализаторов.

В третьей главе рассмотрен общий подход к автоматическому порождению интеллектуальных модулей визуального распознавания и метод комбинаторной виртуализации оптимизации множества алгоритмов распознавания, основанный на поиске решений для проблемы покрытия стеков (SC)^[22]. Следует отметить, что использование задачи SC позволяет найти оптимальное решение для последовательности классификации по признакам в рамках хорошо известной и активно развивающейся системы неокогнитрона^{[23],[24]}. Поскольку проблема SC является **NP**-полной^[22], представляет интерес следу-

²⁰Журавлев Ю.И. Распознавание образов и распознавание изображений / Ж.И. Журавлев, И.Б. Гуревич // Ежегодник "Распознавание. Классификация. Прогноз. Математические методы и их применение". –М.: Наука, 1989. –2 вып. – С.5 –72.

²¹Andreopoulos A. 50 Years of object recognition: directions forward / A. Andreopoulos, J. Tsotsos // Computer vision and image understanding. –2013. – V.117, N.8. –P.827 –891.

²²Gerbush M. Approximating minimum reset sequences / M. Gerbush, B. Heeringa // Lecture notes in computer science. –2011. –V.6482. –P.154 –162.

²³Fukushima K. Neocognitron: a self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected shift in position / K. Fukushima // Biological cybernetics. –1980. –V.36, N.4. –P.193 –202.

²⁴Fukushima K. Artificial vision by multi-layered neural networks: neocognitron and its advances / K. Fukushima // Neural networks. –2013. –V.37. –P.103 –119.

ющее утверждение.

Теорема 5. $CPL \vdash SC \propto_c 3SAT$.

Вычислительные эксперименты показали, что при наличии доступа к внешним вычислительным ресурсам нахождение оптимальных решений для SC возможно при помощи SAT-решателей в режиме реального времени. Получение оптимального решения для SC позволяет значительно снизить время обработки сцены по сравнению с известными приближенными методами.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, относящиеся непосредственно к разработке исследовательского программного комплекса, созданного для исследования проблем, обозначенных в первых трех главах, получения данных для тестирования алгоритмов, проведения вычислительных и робототехнических экспериментов. В частности, в четвертой главе представлена общая модель программного комплекса. Рассмотрены основные инструменты автономного функционирования при невозможности подключения к внешним вычислительным ресурсам. Также в четвертой главе предложен алгоритм обучения на одном примере с помощью имитации, который представляет интерес для начальной настройки робота и получения экспериментальных данных. Этот алгоритм основан на использовании подхода^[25], заключающегося в минимизации отклонения траектории робота \mathbf{P}' от продемонстрированной траектории \mathbf{P} при помощи функции энергии^[26]

$$E = \sum_{w=1}^k \| \mathbf{P}'_w - \mathbf{P}_w \| + \lambda(f) \int \int_{R^2} (f''_{xx} + 2f''_{xy} + f''_{yy}) dx dy,$$

где $\| \mathbf{P}'_w - \mathbf{P}_w \|$ — расстояние между соответствующими контрольными точками траекторий \mathbf{P} и \mathbf{P}' , $f : \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{P}'$. В диссертации в качестве $\lambda(f)$ рассматривается функция, вычисляемая при помощи нейронной сети Рунге – Кутты^[27].

В четвертой главе рассмотрен общий подход к автономному обучению распознаванию, основанный на использовании теоретико-

²⁵Wu Y. Towards one shot learning by imitation for humanoid robots / Y. Wu, Y. Demiris // Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. –Piscataway: IEEE Press, 2010. –P.2889 –2894.

²⁶Bookstein F. Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations / F. Bookstein // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. –1989. –V.11, N.6. –P.567 –585.

²⁷Wang Y.-J. Runge-Kutta neural network for identification of dynamical systems in high accuracy / Y.-J. Wang, C.-T. Lin // IEEE transactions on neural networks. –1998. –V.9, N.2. –P.294 –307.

графовой модели. С использованием этого метода можно получать большие тестовые множества, удовлетворяющие фиксированным параметрам, для проведения других экспериментов.

Следует отметить, что в случае необходимости получения оптимальных решений при невозможности подключения к внешним вычислительным ресурсам в программном комплексе реализован разработанный диссертантом бортовой SAT-решатель: алгоритм GSAT^[28] с адаптивной функцией оценки. Для вычисления значений адаптивной функции оценки в диссертации используются нейронные сети Рунге – Кутты. Описание этого алгоритма и вычислительных экспериментов приведены в четвертой главе. При использовании хорошо обученного генетического алгоритма для адаптации SAT-решатель, предложенный в диссертации, в сравнении с ранее разработанным аналогом^[29], незначительно уступая (1 %) в количестве правильных решений, существенно выигрывает в важнейшей для бортового алгоритма характеристике — скорости (7 раз).

В четвертой главе приведены результаты общего тестирования программного обеспечения робота. Это тестирование показало, что метод комбинаторной виртуализации можно использовать для современных мобильных роботов. При этом в комнатном окружении скорость работы робота Neato XV-11 с бортовым компьютером Sony Vaio PCG-51111v, на котором проводилось тестирование, в автономном режиме уступала скорости телеуправляемого режима не более чем в 1.5 раза (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Среднее значение отношения скорости решения задачи под управлением автономной системы к скорости решения той же задачи в телеуправляемом режиме, где L — обозначает длину траектории (в метрах), а R — количество поворотов.

	$0 < L < 10$	$9 < L < 20$	$19 < L < 40$	$39 < L < 60$
$0 < R < 5$	1.082	1.097	1.119	1.303
$4 < R < 10$	1.094	1.111	1.134	1.342
$9 < R < 20$	1.109	1.129	1.187	1.433

²⁸Selman B. A new method for solving hard satisfiability problems / B. Selman, H. Levesque, D. Mitchell // Proceedings of the 10th national conference on artificial intelligence. –Palo Alto: AAAI Press, 1992. –P.440 –446.

²⁹Popov V. GSAT with adaptive score function / V. Popov // Advanced studies in theoretical physics. –2013. –V.7, N.8. –P.363 –366.

Основные результаты диссертации

Разработан обеспечивающий эффективное решение вычислительно трудных комбинаторных проблем метод комбинаторной виртуализации для мобильного робота с одним визуальным сенсором:

- система математических моделей комбинаторной виртуализации для основных систем мобильного робота с одним визуальным сенсором (системы обработки последовательностей примитивов двигателей; построения панорамного изображения; выбора конкретного множества дорожных знаков; совмещения дорожных знаков на различных изображениях; оптимизации использования анализаторов при распознавании), использующая известные закономерности комбинаторики слов (приближенный период; кратчайшая общая упорядоченная надпоследовательность; циклический центр; наибольшая общая подпоследовательность с ограничениями; минимальное покрытие стеков) и основанная как на хорошо известных подходах, так и на ряде новых идей, предложенных диссертантом.
- система вычислительных методов, обеспечивающих эффективное применение моделей комбинаторной виртуализации:
 - система вычислительных методов для нахождения оптимальных решений с использованием внешних вычислительных ресурсов, основанная на конструктивных сведениях к проблеме 3SAT и применении SAT-решателей;
 - система вычислительных методов для нахождения приближенных решений в реальном времени, основанная на интеллектуальных алгоритмах, использующих для обучения ранее полученные SAT-решателями оптимальные решения;
 - вычислительный метод для нахождения оптимальных решений с использованием бортовых ресурсов, основанный на адаптивной настройке функции оценки хорошо известного алгоритма GSAT при помощи нейронных сетей Рунге – Кутты.

Разработан исследовательский программный комплекс, обеспечивающий для моделей, рассмотренных в диссертации, поддержку автоматизированной подготовки наборов данных для экспериментов, проведения экспериментов и обработки их результатов.

Работы автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Gorbenko A. A graph-based model of object recognition self-learning / A. Gorbenko // Advanced studies in theoretical physics. –2013. – V.7, N.3. –P.115 –120.
2. Gorbenko A. A system of intelligent algorithms for a module of onboard equipment of mobile vehicles / A. Gorbenko // International journal of mathematical analysis. –2013. –V.7, N.47. –P.2317 –2331.
3. Gorbenko A. Automatic generation of modules of object categorization for autonomous mobile robots / A. Gorbenko // AIP conference proceedings. –2013. –V.1558. –P.2087 –2090.
4. Gorbenko A. Automatic generation of modules of visual recognition / A. Gorbenko // Applied mechanics and materials. –2013. –V.416-417. –P.748 –752.
5. Gorbenko A. Graph-theoretic models for the module of safe planning for control systems of mobile robots / A. Gorbenko // Advanced materials research. –2013. –V.683. –P.737 –740
6. Gorbenko A. On the constrained longest common subsequence problem / A. Gorbenko // IAENG international journal of computer science. –2013. –V.40, N.4. –P.266 –273.
7. Gorbenko A. The problem of fingerprints selection for topological localization / A. Gorbenko // Engineering letters. –2013. –V.21, N.4. –P.212 –217.
8. Gorbenko A. The shortest common ordered supersequence problem / A. Gorbenko // Applied mathematical sciences. –2013. –V.7, N.97. –P.4813 –4819.
9. Gorbenko A. On the approximate period problem / A. Gorbenko // IAENG international journal of applied mathematics. –2014. – V.44, N.1. –P.1 –9.

Другие публикации:

10. Горбенко А.А. Программный комплекс обработки робототехнической видеоинформации для построения трехмерных координат объектов / А.А. Горбенко // Труды межвузовской научной конференции по проблемам информатики “СПИСОК-2009”. –Екатеринбург: Издательство Уральского государственного университета, 2009. –С.53 –55.
11. Горбенко А.А. Автоматическое порождение специализированных нейронных сетей / А.А. Горбенко // Труды 42-ой всероссийской молодежной школы-конференции “Современные проблемы математики”. –Екатеринбург: Издательство института математики и механики УрО РАН, 2011. –С.308 –310.
12. Горбенко А.А. Система управления гусеничного робота Kuzma-II / А.А. Горбенко// Тезисы студенческих научных работ XIV Областного конкурса научно-исследовательских работ студентов “Научный Олимп”. Направление “Естественные науки”. –Екатеринбург: Издательство Уральского федерального университета, 2011. –С.7 –8.
13. Gorbenko A. An intelligent self-learning algorithm for safe cooperation in industrial environments / A. Gorbenko // CD proceedings of the 3rd international conference on advanced materials and engineering materials. –Singapore, 2013.

Патенты и свидетельства о регистрации программ:

14. Вихарев С.В., Шека А.С., Брусянин Д.А., Попов В.Ю., Горбенко А.А. Пат. 121628 Российская Федерация, МПК G07C. Интеллектуальная система анализа пассажиропотоков с использованием технического зрения; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью “БрейнКрафт” (RU). – №2012110674; заявл. 20.03.2012; опубл. 27.10.2012, Бюл. №30. – 2 с.: ил.
15. Шека А.С., Горбенко А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012616119 “Управляющая программа гусеничного робота Kuzma-II”. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Зарегистрировано 4 июля 2012 г.